

APLICAÇÃO DA TEORIA WAVELET NA DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DISTÚRBIOS

Núbia Silva Dantas Brito
COPELE/CCT/UFPB - 58109-000
Campina Grande (PB) e-mail: nubia@dee.ufpb.br

Francisca Aparecida de Camargo Pires
DSCE/ FEEC/UNICAMP - 13081-970
CP: 6101 Campinas (SP) FAX: (019)239-1395

Resumo - Este trabalho trata de uma nova ferramenta matemática para sistemas de energia elétrica e, em particular, para **Qualidade da energia elétrica**: a teoria wavelet. Através da aplicação de um caso especial da teoria wavelet (método wavelet multiresolução) em sinais teóricos com distúrbios presentes, avalia-se a sua performance no processo de detecção e localização de distúrbios.

Palavras-chave - wavelet, distúrbio, método wavelet multiresolução.

Abstract - This paper presents a new mathematical tool for **electrical power quality** analysis: the wavelet theory. The basic ideas of the wavelet theory are presented and its performance is evaluated in the detection and localization of disturbances.

Keywords - wavelet, disturbance, multiresolution wavelet method.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o tema **Qualidade da energia elétrica** vem despertando o interesse de engenheiros, pesquisadores e consumidores. **Qualidade da energia elétrica** é uma nova área da engenharia elétrica, a qual trata dos distúrbios causados por harmônicas, variações de tensão (*sag*, *swell*), interrupções transitórias, surtos atmosféricos, *notching*, cintilação, ruído, etc..

Tradicionalmente, estes distúrbios são analisados através da teoria de Fourier. A teoria de Fourier é uma ferramenta matemática poderosa e quando aplicada à sistemas de energia elétrica, oferece interpretações físicas significativas acerca dos distúrbios presentes. No entanto, o método de Fourier só é usado com sucesso se os distúrbios forem do tipo estacionário. Caso contrário, o método de Fourier é inadequado [1]. Deste modo, praticamente, apenas os distúrbios causados por harmônicos são tratados adequadamente por Fourier.

Recentemente, uma nova teoria foi sugerida para tratar de distúrbios do tipo não-estacionário em sistemas de energia elétrica: a teoria wavelet. O autor dessa proposta [1], afirma que esta teoria pode, num futuro próximo, ajudar a identificar e analisar de modo mais eficiente muitos tipos de distúrbios não-estacionários.

A teoria wavelet vem sendo aplicada com sucesso em diversos campos do conhecimento, tais como: astronomia, acústica, processamento de sinal, neurofisiologia, engenharia nuclear, etc.. Em relação aos sistemas de energia elétrica, a bibliografia indica que uma possível aplicação da teoria wavelet ainda está em fase de investigação.

Neste sentido, este trabalho se propõe a avaliar a performance da teoria wavelet, em particular, o método proposto por Santos *et al* [2], na detecção e localização de distúrbios.

2. TEORIA WAVELET

A idéia fundamental na teoria wavelet é a operação escalamento. O escalamento possibilita a compressão ou dilatação de uma função denominada wavelet mãe. Sem muito rigor matemático, uma wavelet mãe $y(t)$ é uma função que oscila, tem energia finita e valor médio nulo. A wavelet mãe escalada, quando deslocada no tempo (translação), origina as wavelets filhas:

$$y_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} y\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

onde a (escala) e b (translação) são reais e $a \neq 0$.

Matematicamente, a teoria wavelet é uma operação linear que decompõe uma função $x(t)$ em um conjunto de wavelets:

$$W_y(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y^* \left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2).$$

A equação (2) é denominada transformada wavelet contínua onde, y^* é o conjugado complexo de y e $W_y(a,b)$ são os coeficientes wavelet da função $x(t)$. Para recuperar $x(t)$ a partir dos

coeficientes wavelet é necessário que a seguinte condição seja satisfeita:

$$C_y = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\Omega)|^2}{|\Omega|} d\Omega(\infty) \quad (3)$$

onde $\Psi(\Omega)$ é a transformada de Fourier de y . Neste caso tem-se a transformada wavelet contínua inversa:

$$x(t) = \frac{1}{C_y} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ W_y(a,b) \right\} \left[\frac{1}{\sqrt{|a|}} \left(\frac{t-b}{a} \right) \right] \frac{dad b}{a^2} \quad (4).$$

Embora a transformada wavelet contínua seja de grande interesse teórico, principalmente para a derivação e compreensão das propriedades matemáticas, a sua discretização é necessária para aplicações práticas. O processo de discretização conduz a transformada wavelet discreta:

$$W_y(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) y \left(\frac{t - na_0^m b_0}{a_0^m} \right) dt \quad (5).$$

Na transformada wavelet discreta apenas os parâmetros da transformada são discretizados. A discretização típica é do tipo: $a = a_0^m$ e $b = na_0^m b_0$, onde m e n são inteiros, $a_0 > 1$ e $b_0 \neq 0$ [3].

No caso contínuo, dada uma função wavelet mãe, uma função qualquer $x(t)$ pode sempre ser recuperada do seu conjunto de coeficientes wavelet contínuos.

No caso discreto entretanto, o processo de reconstrução pode não convergir para a função $x(t)$. A reconstrução depende da escolha da wavelet mãe e do processo de discretização realizado. Para sistemas discretos no tempo, tem-se a série wavelet discreta no tempo:

$$W_y(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) y \left(\frac{k - n b_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (6).$$

Se o processo de discretização dos parâmetros da transformada tem como objetivos: eliminar a redundância presente na forma contínua e garantir a inversibilidade então, a escolha de a_0 e

b_0 deve ser feita de modo que as wavelets filhas formem uma base ortonormal [4]. Esta condição é satisfeita por exemplo, se: $a_0 = 2$ e $b_0 = 1$ [3].

3. A ANÁLISE MULTIRESOLUÇÃO

O método wavelet decompõe um sinal em diferentes escalas ou resoluções. Esta decomposição multiescala ou multiresolução é a essência da teoria wavelet. Na análise multiresolução [5], a função wavelet mãe $y(t)$ é definida a partir de uma função $f(t)$ denominada de função escalamento.

Para que as wavelets filhas formem uma base ortonormal é necessário fazer-se uma escolha apropriada da função $f(t)$. De acordo com Porat [6], esta escolha é feita de modo que exista uma sequência quadrática somável $\{c_n\}$ tal que:

$$f(t) = 2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n f(2t - n) \quad (7).$$

A equação (7) é a equação fundamental da análise multiresolução, a partir da qual a função wavelet mãe é definida:

$$y(t) = 2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} d_n f(2t - n) \quad (8)$$

onde a sequência $\{d_n\}$ é quadrática somável.

A estrutura da análise multiresolução foi utilizada por Daubechies [7], a qual através da aplicação de um algoritmo recorrente, construiu conjuntos de wavelets ortonormais. Utilizando-se a estrutura da análise multiresolução, a série wavelet discreta no tempo é computada, e neste caso convencionou-se chamá-la de método wavelet multiresolução (MWM). Esquemáticamente, tem-se:

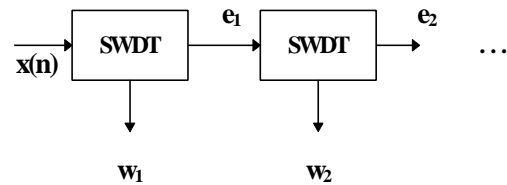


Figura 1 - Estrutura do MWM

Devido a dizimação presente no método (Figura 2), se o sinal $x(n)$ tiver N amostras, os sinais e_1 e w_1 possuirão apenas $N/2$ amostras cada um no mesmo intervalo de tempo, e assim sucessivamente para os demais estágios.

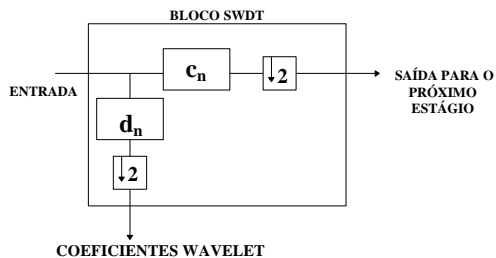


Figura 2 - Um estágio do MWM

No contexto de processamento de sinal, as seqüências $\{c_n\}$ e $\{d_n\}$ são consideradas como sendo os dois canais de um filtro CQF bi-canal (*conjugate quadrature filter*). O filtro c_n é um filtro passa-baixa e o filtro d_n , um filtro passa-alta. A saída de c_n (e_n) é uma versão suavizada do sinal original e a saída de d_n (w_n) é uma versão detalhada do sinal original, a qual corresponde aos coeficientes wavelet. Cada estágio do método corresponde a uma escala.

4. AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DO MÉTODO WAVELET MULTIRESOÇÃO

Para implementação computacional do MWM, utilizou-se as rotinas *wt1* e *daub4* de Press *et al* [8]. Deste modo, a wavelet mãe utilizada no estudo foi a *daub4* e o escalamento, a dilatação. Estas subrotinas quando implementadas, fornecem os coeficientes wavelet ou a operação inversa, isto é, o sinal original.

Utilizou-se vetores representando os sinais elétricos com comprimento $N=1024$, adotando-se θ como sendo a fase inicial do sinal e δ , a posição relativa do distúrbio no sinal [9-10].

Inicialmente, avaliou-se o desempenho do MWM com a variação de θ . Utilizou-se um sinal base (senóide de 60 Hz e 100V de amplitude), no qual superpôs-se um *spike* de 10V de amplitude (Figuras 3a e 3b). Cada *spike* na representação wavelet corresponde a um distúrbio no sinal e cada estágio do MWM corresponde a uma escala. Para detecção dos distúrbios avaliados neste trabalho: distúrbios rápidos e curtos, utilizou-se apenas as duas primeiras escalas do método.

A eficiência do MWM em detectar e localizar no tempo o distúrbio presente no sinal é comprovada usando-se apenas a primeira escala. O método, entretanto, mostra-se sensível ao janelamento efetuado no sinal, desde que a representação wavelet dos dois sinais é diferente: os coeficientes wavelets referentes ao mesmo distúrbio apresentam valores diferentes.

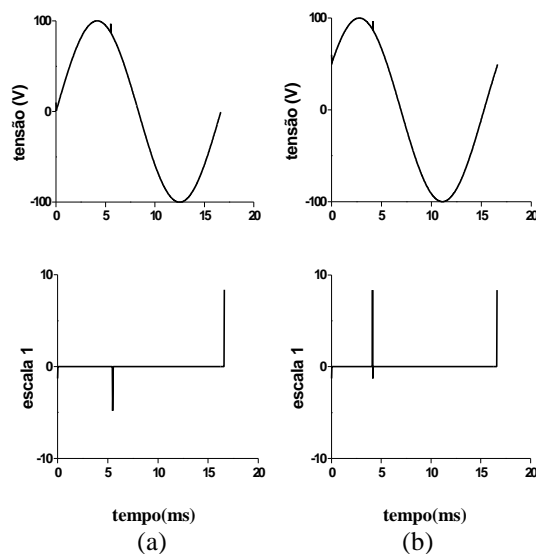


Figura 3 - Método wavelet multiresolução
(a) $\theta=0^\circ$, $\delta=120^\circ$ (b) $\theta=30^\circ$, $\delta=120^\circ$

A seguir, avaliou-se o desempenho do método em relação à variação de δ . Utilizou-se o mesmo sinal, sendo que neste caso, o *spike* foi transladado ao longo do sinal (Figuras 4a e 4b). Analogamente ao caso anterior, apresenta-se apenas a primeira escala. Comprova-se a eficiência do método em detectar e localizar no tempo o distúrbio presente no sinal. Também fica evidente a sensibilidade do MWM em relação à translação do distúrbio no sinal.

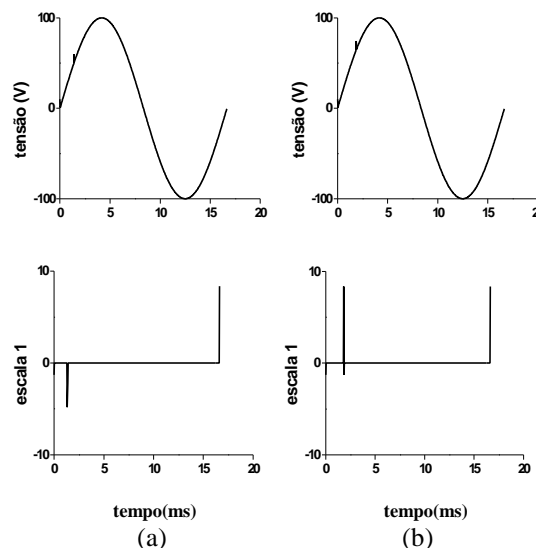


Figura 4 - Método wavelet multiresolução
(a) $\theta=0^\circ$, $\delta=30^\circ$ (b) $\theta=0^\circ$, $\delta=40^\circ$

A sensibilidade do MWM ao janelamento efetuado no sinal e a translações do distúrbio é um problema do passo do método. Este fenômeno é chamado “sensibilidade à translações”, o qual de acordo com a literatura pode ser eliminado ([11] e [12]).

Nas Figuras 3 e 4, observa-se também que a teoria wavelet “vê” qualquer variação brusca no sinal como um transitório e por isso, o fim do janelamento é tratado como tal.

Visando avaliar o comportamento do método diante de outros distúrbios, simulou-se os sinais das Figuras 5, 6 e 7:

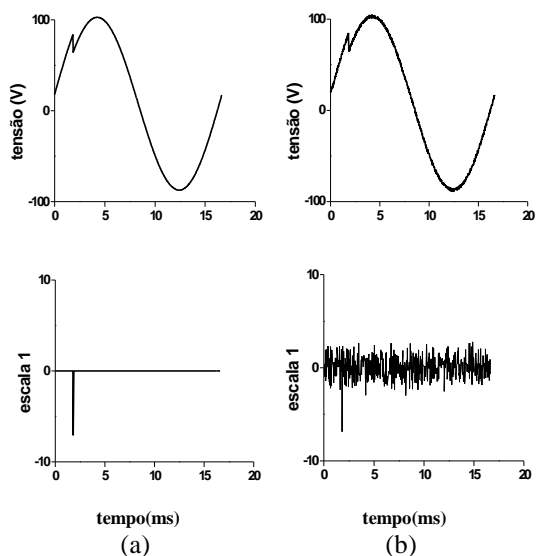


Figura 5 - Método wavelet multiresolução
(a) Sinal sem ruído (b) Sinal com ruído branco

A Figura 5a ilustra um exemplo de um sinal cujo único distúrbio presente é um “corte” na forma de onda. A Figura 5b apresenta o mesmo sinal, porém com um ruído branco presente. Observa-se que o método claramente distingue a presença dos dois distúrbios. Em sinais elétricos reais, o ruído é um distúrbio normalmente presente. Se o ruído não for considerado um distúrbio de interesse na análise, então os coeficientes wavelet devem ser elevados ao quadrado. Esse procedimento reduz os coeficientes wavelet referentes ao ruído em relação aos coeficientes wavelet referentes aos distúrbios de interesse [10].

A Figura 6 ilustra um sinal com um distúrbio semelhante a uma distorção tipo *notching* e neste caso, o MWM detecta e localiza no tempo todos os distúrbios presentes no sinal. Em relação à Figura 7, utilizando-se apenas as duas primeiras escalas, observa-se que o distúrbio mais lento tem um valor mais intenso na segunda escala, o que indica que o método distingue os distúrbios em relação à sua “rapidez”. Entretanto, não é possível

afirmar “categoricamente” a respeito do “tipo” de distúrbio presente.

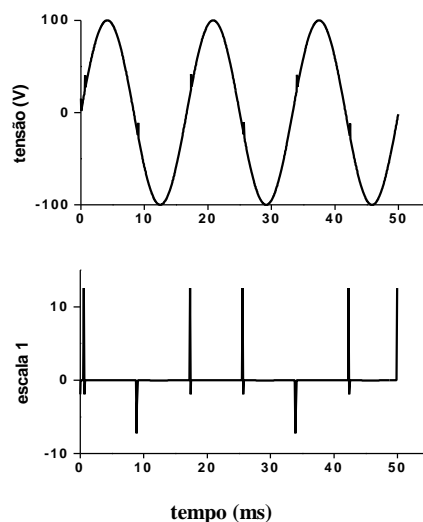


Figura 6 - Método wavelet multiresolução

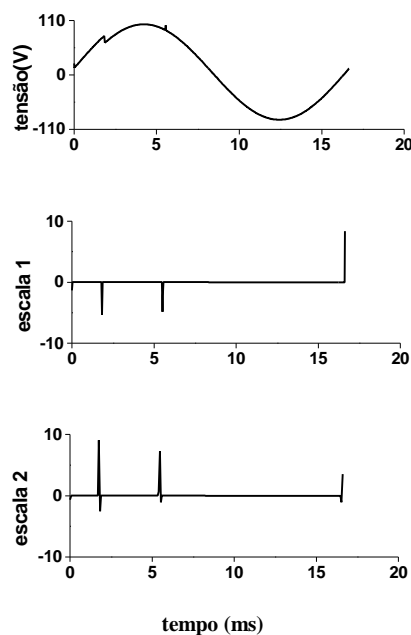


Figura 7 - Método Wavelet Multiresolução
(Análise até a 2ª escala)

5. CONCLUSÕES

Devido ao uso crescente nos sistemas elétricos de cargas não lineares e de equipamentos de eletrônica de potência, a **Qualidade da energia** fornecida pelos sistemas elétricos vem diminuindo nos últimos anos. Uma das formas para se tentar melhorar a **Qualidade da energia** é a identificação das fontes causadoras de distúrbios. A identificação das fontes torna possível a mitigação do distúrbio.

Entretanto, é necessário antes detectar e localizar os distúrbios. De acordo com Santoso *et al* [2], os métodos comumente usados para detecção, localização e classificação de distúrbios não têm apresentado desempenho satisfatório; de modo que pesquisas por métodos mais eficientes vêm sendo conduzidas e, neste contexto, situa-se a teoria wavelet.

Baseando-se no estudo realizado, pôde-se concluir que o MWM é uma ferramenta poderosa para aplicações envolvendo detecção e localização de variações bruscas em formas de onda no domínio do tempo. Entretanto, é necessário a realização de estudos sobre o problema da sensibilidade do método à translações do distúrbio pois, para que o MWM possa ser usado como um ferramenta de classificação de distúrbios, modificações no mesmo devem ser efetuadas.

A decomposição wavelet efetuada na Figura 6 acena com uma remota aplicação da teoria wavelet: um equipamento contador de *spikes*. Neste caso, adotar-se-ia um número limite de *spikes* presentes no sinal de tensão em um certo ponto do sistema durante um intervalo de tempo como parâmetro de **Qualidade**. Para tal, a mitigação do ruído inerente a qualquer sinal real deveria ser assegurada e apenas a primeira escala do método seria utilizada.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dr. Paulo Ribeiro, pelo incentivo e fornecimento de artigos essenciais ao desenvolvimento deste trabalho; ao CNPq, pelo apoio financeiro e a UNICAMP, pelo suporte técnico.

7. REFERÊNCIAS

[1] Ribeiro, P.F., "Wavelet transform: an advanced tool for analysing non-stationary harmonic distortions in Power Systems", Proceeding of IEEE International Conference on Harmonics in Power Systems, pp. 365-369, September 1994, Bologna.

[2] Santoso S., Powers, E.J., Grady, W.M. and Hofmann, P., "Power quality assessment via wavelet transform analysis", IEEE PES Summer Meeting, July 1995, Portland.

[3] Daubechies, I., "Ten lectures on wavelets", SIAM, Philadelphia, 1992.

[4] Vetterli, M. and Herley, C., "Wavelets and filter banks: theory and design", IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 40, September 1992.

[5] Mallat, S., "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation", IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell., vol. 11, pp. 674-693, July 1989.

[6] Porat, B., "Digital processing of random signals - theory and methods", Prentice-Hall, 1994.

[7] Daubechies, I., "Ortonormal bases of compactly supported wavelets", Communications in Pure Applied Math, pp. 909-996, 1988.

[8] Press, W.H., "Numerical recipes in FORTRAN", Cabridge University Press, 1992.

[9] Pires, F.A.C. and Brito, N.S.D. "The analysis of transient phenomena using the wavelet theory", International Conference on Power Systems Transients - IPST'97, June 1997, Seattle.

[10] Brito, N.S.D. "Teoria wavelet e sua aplicação em sistemas de energia elétrica", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Novembro 1996, Campinas.

[11] Mallat, S., "Zero-crossing of a wavelet transform", IEEE Trans. on Information Theory, vol. 37, July 1991.

[12] Liang, J. and Parks, T.W., "A translation-invariant wavelet representation algorithm with applications", IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 44, February 1996.